

УДК 621.8

*М.Н. Ерохин, доктор техн. наук**О.Г. Кокорева, канд. техн. наук*

Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Пластическая деформация поверхностного слоя при обработке деталей динамическими методами ППД осуществляется путем многократного ударно-импульсного воздействия на обрабатываемую поверхность энергонесущей рабочей среды в виде твердых металлических частиц или высокоэнергетического концентрированного потока частиц.

В результате механических, тепловых и структурно-фазовых явлений, протекающих в локальных очагах деформации под воздействием энергонесущей среды, происходит упрочнение поверхностного слоя (ПС). Таким образом, процесс ППД представляет собой совокупность сложных взаимосвязанных явлений, обуславливающих формирование качественно нового поверхностного слоя с более высокими (в сравнении с материалом основы) физико-механическими характеристиками.

Основной характеристикой эффективности упрочнения тем или иным методом ППД служит повышение эксплуатационных свойств деталей, таких как сопротивление усталости, контактная выносливость, износостойкость. Однако их определение в зависимости от многих параметров процесса длительно и трудоемко.

В связи с этим целью исследований явилось обоснование такого критерия, который позволял бы в обобщенном виде отражать физическую сущность как процессов, происходящих в ПС при его пластической деформации, так и условий обработки.

К наиболее перспективным методам решения этой задачи относится метод энергетической оценки явлений и условий протекания процесса ППД. Обработка ППД связана с работой, затрачи-

ваемой на пластическую деформацию, и как следствие на упрочнение поверхностного слоя, которое в свою очередь зависит от энергетического состояния.

Следовательно, поверхностная энергия является одной из основных характеристик материала, определяющих его деформируемость, а также физико-механические свойства ПС после ППД.

В области оценки механических свойств материалов, их сопротивления пластической деформации в зависимости от напряженного состояния скоростных, температурных режимов деформирования, химического и фазового состава, а также их структуры накоплен большой экспериментальный опыт.

Особенность большинства исследований, проведенных в этом направлении, заключается в том, что они рассматриваются с позиции механики твердого тела в рамках теорий упругости и пластичности. На основе этих исследований предложено много инженерных методов расчета характеристик ПС и эксплуатационных свойств деталей.

Однако применяемые для описания процесса ППД механические теории базируются на ряде допущений. Это во многих случаях упрощает задачу, но при этом отдаляя ее от действительности.

В последние годы в науке о прочности активно развивается новое направление, основанное на термодинамическом рассмотрении механизмов и закономерностей пластической деформации при разрушении материалов.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по кинетике деформиро-

вания и разрушения различных материалов, обсуждение которых содержится во многих опубликованных работах, позволили с учетом современных представлений подойти как к описанию явлений процесса ППД, так и к их энергетической оценке.

В соответствии с современными представлениями любой процесс деформирования и разрушения твердых тел является кинетическим и необратимым независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения [1, 2].

Это положение в полной мере относится и к процессу ППД, поскольку по своей сути, как было раскрыто в многочисленных исследованиях методов ППД [3–5], он является процессом объемной повреждаемости материала, при котором в деформируемом элементе поверхностного слоя зарождаются и накапливаются различного рода дефекты и повреждения.

Представление процесса ППД как кинетического основывается на двух экспериментально установленных фактах, первый из которых свидетельствует о его статистическом характере, который раскрывает его феноменологическую сторону. В основе феноменологического процесса лежит зависимость упрочнения элемента ПС от силовых параметров нагружения и времени (циклов) их воздействия (рис. 1а и б). Из анализа этой зависимости следует, что если два процесса ППД, сопровождающихся упрочнением вследствие внутренней повреждаемости элемента ПС, протекают как при более высоких внешних силовых параметрах нагружения, так и при более низких, то различие в поведении деформируемого элемента ПС будет зависеть только от скорости (степени) его повреждаемости.

Статистически процесс ППД протекает следующим образом. В каждый момент времени (или цикл формирования элемента ПС) выбранным условиям нагружения соответствует определен-

ная степень его повреждаемости. Как только повреждаемость материала в локальном микрообъеме превышает предельное (критическое) значение, начинается процесс его разрушения в виде микро- и макронарушений.

Это подтверждают результаты исследований влияния продолжительности обработки ППД на сопротивление усталости и износостойкость образцов, которые показали, что с появлением на поверхности признаков разрушения (микротрещины) эксплуатационные показатели образцов начинают снижаться [4].

Это позволяет предполагать, что при ППД существует критическая величина накопления повреждаемостей, при которой обеспечивается наибольший эффект упрочнения поверхности, оказывающий положительное влияние на эксплуатационные характеристики деталей.

Вышеизложенные представления и закономерности процесса ППД можно описать и проиллюстрировать следующим образом.

Обозначим через U количественную меру повреждаемости элемента ПС в процессе ППД, через U^* – степень повреждаемости, а через \vec{U}_i – скорость повреждаемости за один цикл нагружения.

Тогда при любом способе внешнего силового воздействия (динамическом, квазистатическом) повреждаемость элемента ПС при каждом цикле нагружения будет изменяться со скоростью \vec{U}_i , которая в общем случае является функцией силового параметра деформирования P , продолжительности протекания процесса t или числа циклов нагружения i .

Графически это можно представить в виде кинетических кривых (см. рис. 1б), из анализа которых следует, что по мере деформирования элемента ПС его повреждаемость возрастает. Увеличение происходит до тех пор, пока повреждаемость не достигнет критической величины U^* .

Как показали исследования, значение U^* определяется свойствами материала и не зависит от способа и параметров силового нагружения ПС. Последнее обстоятельство обусловлено феноменологичностью процессов деформирования и разрушения материалов.

Кривые, характеризующие изменение критической величины повреждаемости элемента ПС в зависимости от силовых параметров и числа циклов нагружения ПС, могут быть построены для любого уровня повреждаемости $U < U^*$.

Следует записать условия предельной повреждаемости, обуславливающие максимальное

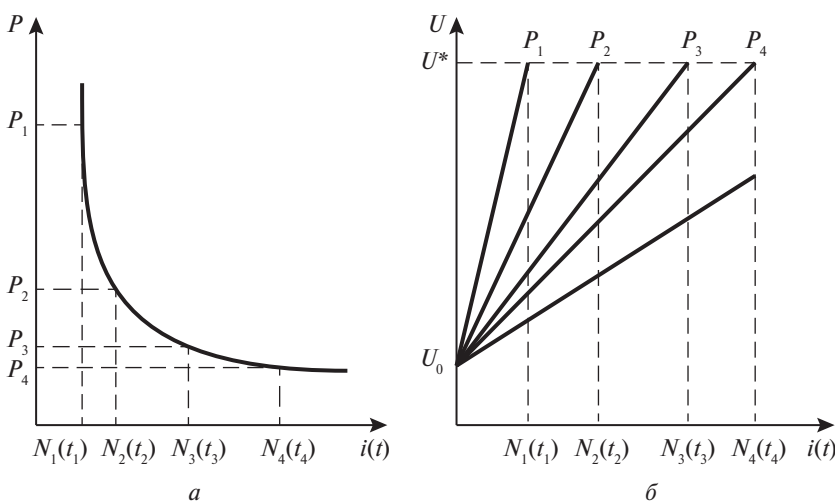


Рис. 1. Зависимости, отражающие кинетическую сущность процесса ППД

с точки зрения повышения эксплуатационных свойств упрочнение ПС:

$$U = U_0 + \sum_{i=1}^N U_i = U^* = \text{const}, \quad (1)$$

где U_0 — уровень повреждаемости ПС, накопленной на стадии обработки, предшествующей ППД; N — предельное число циклов нагружения ПС.

Таким образом,

$$U_i = \int_0^{t_i} U_i(t) dt.$$

Принимая, что повреждаемость деформируемых в процессе ППД локальных объемов при каждом цикле силового нагружения носит необратимый характер, а степень упрочнения есть результат накопления (суммирования) поврежденностей, можно сделать вывод, что предельная повреждаемость и как следствие предельное упрочнение ПС произойдет тогда, когда сумма относительных повреждений станет равна единице:

$$\left(\frac{1}{U^*}\right) \sum_{i=1}^{i=N} U_i = 1. \quad (2)$$

Эта зависимость позволяет прогнозировать предельное число циклов силового нагружения ПС в целях достижения в нем максимально эффективной степени упрочнения при условии знания зависимости $U_i(P_i, t_i)$.

Таким образом, в соответствии с современными представлениями, процесс ППД является кинетическим процессом, протекающем во времени.

Однако для практического применения зависимостей (1) и (2), описывающих процесс ППД с позиции кинетики, при проектировании операций упрочнения необходимо установить параметр U , которым можно интегрально характеризовать повреждаемость элемента ПС в процессе ППД.

С этой целью рассмотрим процесс ППД с позиции термодинамической теории [6]. В соответствии с ее основными положениями поверхностный слой любого твердого металлического тела, подвергаемый деформированию в процессе ППД так же, как и само тело, структурно принимается как квазисплошная и неоднородная среда, в которой статистически равномерно распределены структурные элементы и различного рода дефекты и повреждения. Одни из них являются внутренними источниками элементарных дефектов, другие — препятствиями для их движения.

Физически макроскопическое явление пластической деформации, повреждаемости и разрушения элемента ПС в процессе ППД рассматривается как совокупность огромного числа микроскопических элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок, обуславливающих движение, взаимодействие и уничтожение на стоках дефектов.

Скорость пластической деформации элемента определяется скоростью движения и уничтожения элементарных дефектов за счет флуктуации тепловой энергии под воздействием внешних сил.

Повреждаемость материала в процессе ППД связана с накоплением в деформируемых объектах ПС различных дефектов и скоплений. Разрушение макроскопического элемента ПС происходит при последующем деформировании объемов, имеющих предельную плотность дефектов.

Таким образом, энергетический процесс ППД можно интерпретировать как процесс одновременного протекания в деформируемых объектах ПС двух противоположных взаимосвязанных явлений:

- роста плотности скрытой энергии E_c дефектов и повреждений, накапливающихся в материале за счет работы $A_{пл}$;
- снижения значения E_c за счет различных релаксационных процессов, протекающих внутри деформируемого элемента ПС.

При этом рост плотности скрытой энергии связан с повреждаемостью материала и как следствие упрочнением ПС, а ее снижение вызвано динамическим возвратом (разупрочнением) вследствие теплового эффекта пластической деформации q .

Тогда согласно основному закону термодинамики — закону сохранения энергии при ее превращении — уравнение энергетического баланса процесса ППД для единичного локального объема ПС имеет вид

$$A_{пл} = \Delta E_c + q.$$

Экспериментально установлено, что значительная часть тепловой энергии связана с тепловым эффектом процесса ППД, не задерживается в деформируемом элементе ПС, а рассеивается по объему детали, деформирующих тел (иденторов) обрабатывающего инструмента или среды и в окружающей среду за счет теплообмена q .

При этом лишь незначительная часть этой энергии задерживается в деформируемом элементе ПС, повышая его внутреннюю энергию на величину E_T .

Таким образом, тепловой эффект пластической деформации можно представить как

$$q = \bar{q} + \Delta E_c.$$

Уравнение энергетического баланса процесса ППД в виде

$$A_{пл} = \Delta E_c + q.$$

Накапливаемая в деформируемом элементе ПС внутренняя энергия ΔE (рис. 2) определяется суммой двух составляющих: потенциальной (скрытой) ΔE_c и кинетической (тепловой) ΔE_T :

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_T. \quad (3)$$

Именно эта энергия связана с повреждаемостью материала ΔE_c и его термическим разупрочнением ΔE_t ; она является ответственной за прочностные свойства ПС, формируемого в процессе ППД, и, значит, вполне обоснованно может быть принята за интегральную меру повреждаемости элемента ПС.

Поскольку упрочнению ППД, как правило, подвергаются детали, предварительно прошедшие механическую формообразующую обработку, для оценки и прогнозирования прочностных свойств ПС необходимо учитывать внутреннюю энергию E_0 , запасенную в деформируемом элементе на предшествующих ППД этапах обработки.

В общем виде энергетическое состояние деформируемого в процессе ППД элемента описать уравнением

$$E = E_0 + \Delta E. \quad (4)$$

В соответствии с кинетическими представлениями процесса ППД поверхностный слой считается максимально эффективно упрочненным, когда внутренняя энергия E в деформируемых элементах, находящихся на поверхности ПС, достигнет предельной (критической) величины E .

Это состояние ПС для конкретных условий процесса ППД характеризуется физико-механическими характеристиками, обеспечивающими максимальное повышение эксплуатационных свойств деталей.

Следовательно, предельную внутреннюю энергию можно принять в качестве критерия упрочнения, а энергетическое условие предельной деформируемости ПС можно записать в виде

$$E = E_0 + \sum_{i=1}^N \Delta E_i = E^* = \text{const}, \quad (5)$$

где E_0 — внутренняя энергия в локальном макрообъеме ПС в исходном (до ППД) состоянии, учитывающая наследственные свойства материала при глубине его залегания $h = 0$; ΔE_i — изменение внутренней энергии в локальном макрообъеме в процессе ППД в функции $\Delta E_i(P_i, t_i)$.

Для количественной оценки предельной внутренней энергии E^* , при которой в процессе ППД достигается максимальное с точки зрения повышения эксплуатационных свойств упрочнение ПС, можно воспользоваться аналогией между процессами поглощения энергии кристаллической решеткой при механическом нагружении при нагреве [7].

И в том, и в другом случае нарушение межатомных связей наступает в результате поглощения пре-

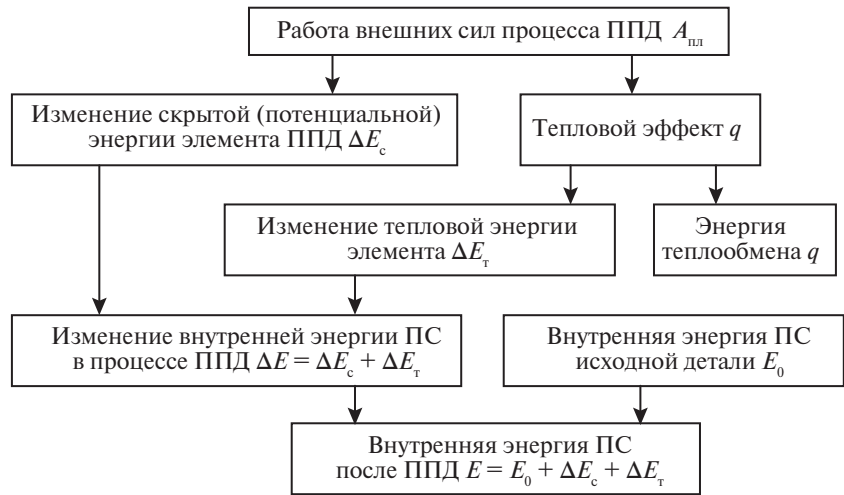


Рис. 2. Энергетический баланс процесса ППД

дельной для данной кристаллической решетки величины энергии. В случае нагрева металла от заданной температуры T_0 до температуры плавления T_s поглощаемая предельная удельная энергия

$$F = \int_{T_0}^{T_s} C_p dT + L_{пл}, \quad (6)$$

где C_p — удельная теплоемкость; $L_{пл}$ — скрытая теплота плавления.

Величина $\int C_p dT$ — характеризует изменение количества теплоты металла при нагреве от заданной температуры до температуры плавления; она расходуется на возбуждение атомных колебаний критической величины без нарушения межатомных связей. Эти нарушения возникают, когда кристаллическая решетка поглощает дополнительную энергию, равную скрытой теплоте плавления.

При механическом нагружении, как и при плавлении, процессу нарушения межатомных связей предшествует искажение кристаллической решетки до критической величины с тем лишь различием, что при механическом нагружении предельное искажение кристаллической решетки обусловлено достижением в деформируемых локальных объемах ПС критической плотности дислокаций, при которой дальнейшее поглощение энергии кристаллической решеткой приводит к разрушению межатомных связей.

Если принять, что удельная энергия, затрачиваемая на предельное искажение кристаллической решетки, не зависит от вида подводимой энергии (тепловая или механическая), то предельная удельная энергия, которую способна поглотить кристаллическая решетка, должна соответствовать теплоемкости (энтальпии) металла.

Из этого следует, что критическая внутренняя энергия E^* , накапливаемая в деформируемом эле-

менте ПС после ППД, количественно может быть оценена посредством термодинамической константы — энтальпии металла в твердом состоянии H при температуре плавления:

$$E^* = \int_{T_0}^{T_s} C_p dT = H. \quad (7)$$

Используя вышеприведенную аналогию, уравнение энергетического баланса процесса ППД можно представить в виде

$$A_{\text{пл}} = (P_i, t_i, i) = (1 + K_{\text{ТП}})\Delta H, \quad (8)$$

где $K_{\text{ТП}} > 1$ ($K_{\text{ТП}} = 3,5...4,0$ [8]) — коэффициент, учитывающий значение тепловой энергии пластической деформации, не задерживающейся в деформируемом элементе ПС ($q = K_{\text{ТП}}\Delta H$); $\Delta H = H - E_0$ — изменение энтальпии металла в процессе ППД.

Однако следует отметить, что подобная аналогия правомерна только для локальных объемов металла. Ее перенос на уровень больших объемов неправомерен, поскольку в процессе нагрева энергия поглощается кристаллической решеткой практически равномерно по всему объему металла, а при пластической деформации вследствие анизотропии и несовершенства кристаллической решетки происходит неоднородное поглощение энергии.

В целях учета этого фактора надо рассмотреть объемы, принимающие участие в поглощении энергии в процессе ППД с момента его начала ($i = 1$) до момента, когда обеспечивается максимально эффективное упрочнение детали ($i = N$).

Предположим, что при подведении к детали объемом V механической энергии в процессе пластической деформации максимально эффективно упрочняется поверхностный слой объемом V_s (рис. 3а). При этом в локальных в граничной зоне ПС детали искажения кристаллической решетки достигают предельной величины.

Следует обозначить объем граничной зоны ПС детали, в которой образуются искажения предельной величины, через V_u , согласно вышеизложенной энергетической интерпретации процесса ППД изменение внутренней энергии должно соответствовать изменению энтальпии металла ΔH . Тогда предельная энергия искажения ПС

$$Q_u^* = V_u \Delta H. \quad (9)$$

Каждый единичный локальный объем в пределах ПС, за исключением граничной зоны V_u , накапливает в процессе ППД какую-то энергию искажения, численно равную $n\Delta H$, где n — энергетический коэффициент, оценивающий степень искаже-

ния локального объема по глубине его залегания от поверхности и зависящий от структурного состояния, предыстории металла и условий его нагружения.

В пределах ПС энергетический коэффициент n изменяется от 1 (при $h = h_u$) до 0 (при $h = h_u$). Зная закономерность изменения энергетического коэффициента по глубине ПС $n = n(h)$, величину энергии поглощаемой объемом $V_s - V_u$, можно представить в виде

$$Q_s = (V_s - V_u)\Delta H \int_{h_u}^{h_s} n(h) dh. \quad (10)$$

Просуммировав уравнения (9) и (10), получим выражение общей энергоемкости предельно упрочненного ПС, при котором достигается наибольший эффект в процессе ППД и обеспечивается наибольшее повышение эксплуатационных характеристик проведения операции упрочнения:

$$Q_{y^*} = Q_s + Q_{y^*} = (V_s - V_u)\Delta P \int_{h_u}^{h_s} n(h) dh + V_u \Delta H. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) с термодинамических позиций и представлений процесса ППД позволяет предположить, что величина V_u , охватывающая предельно искаженный объем ПС, является постоянной, она определяется типом кристаллической решетки материала и не зависит от способа силового нагружения.

В качестве подтверждения сделанного вывода могут служить исследования [6], показавшие, что независимо от условий механического нагружения глубина залегания этого объема h_u находится в пределах среднего размера зерна.

Способ силового нагружения, а также структурное состояние материала и его предыстория характеризуются величинами V_s и n .

Из вышеперечисленных рассуждений, основанных на результатах многочисленных исследований процесса ППД, следует: специфика пластической деформации такова, что при действии ме-

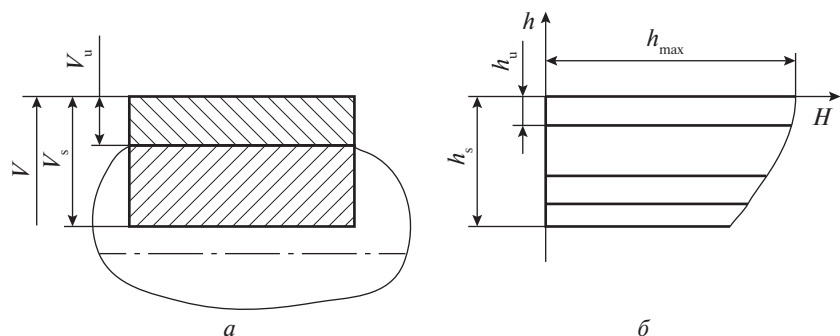


Рис. 3. Энергетическое состояние локальных объемов ПС после ППД: а — упрочнение слоя; б — графическая интерпретация

ханических нагрузок на материал детали с любым кристаллическим строением, в том числе и предельным, объем искажений V_s всегда будет на порядок меньше V . При нагреве же металлов, как известно, процесс нарушения связей происходит по объему металла более однородно.

Определив, таким образом, предельную энергию детали объемом V с идеальным кристаллическим строением, упрочненной методом ППД, в виде $Q_{y*} = V_s \Delta H$ и сравнив ее с предельной энергоемкостью аналогичной детали, нагретой до температуры плавления

$$Q_{T*} = V \Delta H,$$

можно заключить, что

$$Q_{T*} \neq Q_{y*}.$$

На основании этого энергию, затраченную на искажение и как следствие упрочнение детали, можно приравнять к теплосодержанию металла при нагреве лишь в том случае, если удельная энергия искажения определяется не по отношению ко всему объему металла, подвергшегося воздействию внешних сил, а по отношению к единице локального объема, и искаженного в процессе ППД.

На рис. 3б приведена графическая интерпретация энергетического состояния локальных объемов по глубине ПС.

Для количественной оценки внутренней энергии, накапливаемой локальным микрообъемом в пределах ПС, находящимся на глубине h_{si} , следует разделить обе части уравнения (11) на V_s :

$$\frac{Q_{y*}}{V_s} = \Delta H \left(1 - \frac{V_u}{V_s} \right) \int_0^{h_{si}} n(h) dh = \left(\frac{V_u}{V_s} \right) \Delta H. \quad (12)$$

Если пренебречь отношением V_u / V_s ввиду малости и представить

$$Q_{y*} / V_s \neq \Delta E,$$

можно получить выражение, позволяющее оценить энергетическое состояние деформируемых в процессе ПД локальных объемов в зависимости от глубины их залегания в ПС:

$$\Delta E_i(h_{si}) = n(h_{si}) \Delta H. \quad (13)$$

С учетом наследственных свойств материала общее энергетическое состояние локального объема после ПДД можно представить в виде

$$\Delta E_i(h_{si}) = n(h_{si}) \Delta H = E_0. \quad (14)$$

На основании проведенных исследований, используя выражения (8) и (13), записывают уравнение энергетического баланса локального объема, сформированного ППД в пределах предельно упрочненного ПС, обеспечивающего наиболее эф-

фективное повышение эксплуатационных свойств деталей:

$$A_{пл} = (P_i, t_i) = (1 + K_{ТП}) \Delta H (h_{si}). \quad (15)$$

Так как при реализации операций упрочнения методами ППД силовому механическому воздействию подвергается поверхность детали, то очень важно для решения технологических задач оценить работу внешних сил, приходящихся на единицу обрабатываемой площади, приняв

$$V_s = S h_s, \quad V_u = S h_u,$$

где s — площадь элементарного участка упрочнения детали, из выражения (11) получают уравнение для определения удельной работы внешних сил, затрачиваемой на предельно эффективную пластическую деформацию единичного объема ПС, формируемого в процессе ППД высотой h_s :

$$A_{пл} = (P_i, t_i, i) = (1 + K_{ТП}) \Delta H \int_{h_u}^{h_s} n(h) dh. \quad (16)$$

Для объективности анализа работы внешних сил, обеспечивающих процесс ППД, необходимо учитывать, что пластической деформации ПС предшествует его упругая деформация.

Удельная работа упругой деформации локального объема

$$A_{упр} = \sigma_T \frac{\Delta H}{2E},$$

где σ_T — предел текучести; E — модуль упругости обрабатываемого материала.

Тогда обобщенное уравнение энергетического баланса процесса ППД можно записать в виде

$$A'_{пл} = (P_i, t_i, i) = \left[(1 + K_{ТП}) \Delta H + \sigma_T \frac{\Delta H}{2E} \right] \int_{h_u}^{h_s} n(h) dh. \quad (17)$$

Полученное в результате энергетического анализа процесса ППД уравнение (17) является критериальным, поскольку позволяет обосновать как технологические параметры реализации процесса, так и физико-механические характеристики ПС, сформированного в результате операции упрочнения динамическими методами ППД.

Таким образом, в результате проведенного энергетического анализа процесса поверхностей пластической деформации выполнена количественная оценка работы внешних сил с позицией энергетического баланса процесса ПДД. Установлено влияние энергетических составляющих на прочностные свойства поверхностного слоя деталей упругими методами ППД.

Таким образом, рассмотрена взаимосвязь механического нагружения и микроструктуры металла с термодинамическими позициями; получено уравнение энергетического баланса локального объема,

сформированного ППД при упрочнении поверхностного слоя детали.

Список литературы

1. Фёдоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. — Ташкент: Изд-во «Фан», 1985. — 166 с.
2. Осипов К.А. Некоторые активизируемые процессы в твердых металлах и сплавах. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 130 с.
3. Кудрявцев И.В. Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа. — М.: Машиностроение, 1965. — 264 с.
4. Генкин И.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. — М.: Машиностроение, 1981. — 232 с.
5. Гринченко И.Г. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. — М.: Машиностроение, 1971. — 120 с.
6. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. — Ташкент: Изд-во «Фан», 1979. — 168 с.
7. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. — М.: Metallurgizdat, 1963. — 272 с.
8. Павлов В.А. Физические основы пластической деформации металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 198 с.

УДК 621–182.8

О.А. Леонов, доктор техн. наук

Ю.Г. Вергазова

Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева

РАСЧЕТ ПОСАДОК СОЕДИНЕНИЙ СО ШПОНКАМИ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Большинство мобильных уборочных и других сельскохозяйственных машин оснащены цепными передачами и редукторами. Наибольшее распространение в звездочках цепных передач получили соединения со шпонкой типа «вал–втулка звездочки», а в редукторах — «вал–втулка шестерни».

Рассмотрим подробнее процесс изнашивания и контактирования поверхностей соединения при вращении. Относительному проворачиванию препятствует шпонка, поэтому идет постоянный микросрыв шероховатостей из-за неравенства длин окружностей отверстия и вала и при каждом цикле «нагрузка–вращение» встречаются те точки, которые уже были в контакте между собой. Такой процесс контактирования приводит к значительному и в то же время равномерному износу поверхностей вала и втулки [1–4].

Таким образом, на процесс изнашивания в значительной мере оказывает влияние относительное перемещение поверхностей, величина зазора или раскрытия стыка, а также наличие абразива и смазки в зоне трения: чем больше зазор, тем меньше площадь контакта, больше удельное давление, больше скорость микросрыва, больше загрязнений попадает в зону контакта, интенсивнее изнашиваются поверхности.

Особо следует рассмотреть изнашивание соединения «шпонка–паз вала–паз втулки». При увеличении зазора в соединении «вал–втулка» шпонка начинает больше перемещаться в вертикальной плоскости, что приводит к уменьшению площади

ее контакта с пазом вала и втулки. От возникающих микросрывов идет ударно-волновое нагружение, что приводит к повышению износа и смятию поверхностей в соединении «шпонка–паз вала–паз втулки» в слабых элементах поверхности — углах. С увеличением размеров пазов и уменьшением размера шпонки еще больше уменьшается площадь контакта, шпонка перекашивается в пазах и начинает приобретать закругленную форму. Паза также деформируются и увеличиваются в размерах. Данному процессу значительно способствует наличие загрязнений в зонах трения.

Раскрытие стыка от действия радиальной силы нужно компенсировать натягом в соединении, что предотвратит проникновение пыли и абразива в зону трения, снизит относительное перемещение поверхностей и значительно уменьшит износ шпонки и пазов. Но большие величины натягов здесь не приемлемы, так как конструктивной особенностью данного соединения является обеспечение условий многократной разборки-сборки с целью ремонта и технического обслуживания сопрягаемых сборочных единиц.

Таким образом, для данного соединения необходимо провести расчет оптимальных норм взаимозаменяемости [3].

Существующая методика расчета и выбора посадок с натягом не подходит для такого расчета, так как не учитывает влияния радиальной и консольной нагрузки на раскрытие стыка соединения. Авторы предлагают новую методику расчета, значительно корректирующую и развивающую старую.